

Sains Malaysiana 47(4)(2018): 853-859
<http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2018-4704-25>

Kecekapan Pengumpul PV/T Menggunakan Pengumpul Terma Reka Bentuk Pilin (Efficiency of PV/T Collector using Spiral Thermal Absorber Design)

CHEKU NURUL AISYAH, AHMAD FUDHOLI*, MOHD YUSOF OTHMAN, ADNAN IBRAHIM, MOHD HAFIDZ RUSLAN &
KAMARUZZAMAN SOPIAN

ABSTRAK

Kajian ini bertujuan untuk mereka bentuk dan mengkaji prestasi pengumpul fotovoltan-terma (PV/T) dengan menggunakan reka bentuk pengumpul terma aliran air secara pilin. Reka bentuk pengumpul terma aliran air secara pilin telah dibina semula daripada reka bentuk penyelidik sebelum ini. Pengumpul terma ini menggunakan saiz tiub yang lebih besar dan jarak antara tiub lebih dekat berbanding dengan reka bentuk penyelidik sebelum ini. Pengumpul PV/T ini telah diuji di bawah tiga keamatan yang berbeza iaitu 300, 500 dan 700 W/m² serta diuji pada kadar aliran jisim air yang berbeza iaitu 0.01, 0.02 dan 0.04 kg/s. Pada keadaan yang sama, kecekapan fotovoltan, terma dan tergabung juga menunjukkan nilai yang paling tinggi, iaitu 4.18%, 76.68% dan 80.86%. Kecekapan terma yang dihasilkan pada kajian ini lebih tinggi dibandingkan dengan kajian sebelumnya.

Kata kunci: Elektrik; kecekapan; tenaga suria; terma

ABSTRACT

This study aimed to design and assess the photovoltaic-thermal (PV/T) collector performance using spiral thermal collector design. The design of the spiral water collector was rebuilt from previous researchers design. The thermal collectors use a larger tube size and the distance between the tubes closer than with previous researchers design. PV/T collector has been tested under three different intensities, which are 300 W/m², 500 W/m² and 700 W/m² and also tested at three different water mass flow rates, which are 0.01, 0.02 and 0.04 kg/s. At the same circumstances, the efficiency of photovoltaic (PV), thermal and PV/T also shows the highest value, which are 4.18%, 76.68% and 80.86%. In this study, the result of thermal efficiency is higher than the previous study.

Keywords: Efficiency; electrical; solar energy; thermal

PENGENALAN

Suhu permukaan dan sel fotovoltan memainkan peranan penting dalam meningkatkan kecekapan pengumpul fotovoltan, ini kerana kecekapan fotovoltan akan merosot selari dengan peningkatan keamatan sinaran suria. Pengumpul fotovoltan hanya menggunakan sebahagian kecil sinaran suria untuk menghasilkan tenaga elektrik, manakala sebahagian besarnya menghasilkan tenaga haba yang memanaskan permukaan permukaan sel fotovoltan. Untuk meningkatkan kecekapan tenaga elektrik kepada tahap yang memuaskan, perlunya satu medium yang boleh menyerap tenaga haba daripada pengumpul fotovoltan dengan efektif. Pengumpul terma boleh dipasangkan di bawah pengumpul fotovoltan untuk mengeluarkan tenaga terma yang terhasil kepada aliran air yang mengalir di dalam tiub. Seterusnya, air yang mempunyai muatan haba tinggi akan menyerap tenaga haba tersebut dan memindahkan ke dalam tangki air untuk kegunaan pelbagai. Pengumpul ini dinamakan sebagai pengumpul fotovoltan-terma (PV/T) dengan tenaga elektrik dan tenaga terma boleh dihasilkan secara serentak. Pengumpul PV/T ini juga akan menghasilkan air panas. Sadishkumar dan

Balusamy (2014) berpendapat bahawa air panas sangat penting bagi aplikasi industri dan domestik. Ia diperlukan untuk mandi, membasuh pakaian dan peralatan dapur serta kegunaan domestik yang lain sama ada di kawasan bandar atau pun luar bandar. Air panas juga diperlukan dalam kuantiti yang banyak di hotel, hospital, asrama dan industri seperti tekstil, kertas dan pemprosesan makanan.

Beberapa penyelidik telah membina dan menilai prestasi pengumpul PV/T aliran air (Fudholi et al. 2014; Ibrahim et al. 2014, 2009; Mishra et al. 2013). Tripanagnostopoulos et al. (2002) telah membuat kajian menguji kecekapan pengumpul PV/T aliran air terhadap dua jenis sel suria iaitu a-Si dan c-Si. Keputusan menunjukkan kecekapan prototaip c-Si adalah 55% dan prototaip a-Si adalah 60%. Menurut Kim dan Kim (2012a) untuk melihat prestasi pengumpul terma dan fotovoltan tidak hanya berkaitan dengan penutup atau tanpa penutup sahaja, tetapi berdasarkan reka bentuk pengumpul terma juga boleh memberi kesan ke atas prestasi pengumpul suria fotovoltan-terma (PV/T). Mereka menggunakan saluran yang berbentuk segi empat untuk meluaskan kawasan permukaan pemindahan haba. Ibrahim et al.

(2009) juga menyarankan agar reka bentuk pengumpul terma meliputi keseluruhan kawasan bawah permukaan pengumpul fotovoltan untuk mendapatkan keputusan yang memuaskan.

Pengumpul fotovoltan-terma (PV/T) boleh diklasifikasikan kepada dua jenis pengumpul suria iaitu dengan penutup dan tanpa penutup. Perbezaan kedua-dua jenis pengumpul ini adalah dengan ketiadaan lapisan udara (statik) diantara penutup dengan pengumpul fotovoltan (Dupreyat et al. 2014). Pengumpul PV/T dengan penutup mempunyai kelebihan dalam menghasilkan kecekapan terma yang tinggi tetapi bagi kecekapan fotovoltan pula ia tidak menunjukkan prestasi yang memberansangkan (Kim & Kim 2012b). Aste et al. (2014) mengatakan bahawa pengumpul suria tanpa penutup menghasilkan kecekapan terma rendah daripada pengumpul PV/T dengan penutup, ini disebabkan oleh kehilangan haba secara radiasi dan perolakan melalui bahagian atas pengumpul fotovoltan. Walau bagaimanapun, penghasilan kecekapan tenaga elektrik yang terbaik adalah daripada pengumpul PV/T tanpa penutup (Dupreyat et al. 2014; Kim & Kim 2012b; Sandness & Rekstad 2002). Menurut Zondag (2008) penurunan kecekapan elektrik sebahagian besarnya adalah disebabkan oleh penambahan penutup kaca pada pengumpul PV/T, dengan penambahan penutup kaca jenis rendah-besi akan menurunkan kecekapan elektrik kepada 8% manakala untuk penutup kaca yang mempunyai transmisi tinggi boleh kurangkan kepada 4%. Zondag et al. (2003) telah membuat perbandingan kecekapan elektrik antara pengumpul fotovoltan konvensional, pengumpul PV/T tanpa penutup kaca dan pengumpul PV/T dengan penutup kaca. Purata tahunan kecekapan elektrik yang terhasil adalah 7.2%, 7.6% dan 6.6%. Pengumpul PV/T tanpa penutup kaca menghasilkan kecekapan elektrik yang tertinggi. Menurut Tripanagnostopoulos et al. (2002) pengumpul PV/T dengan penutup kaca memberi kecekapan terma yang tinggi iaitu 30% tetapi menyebabkan

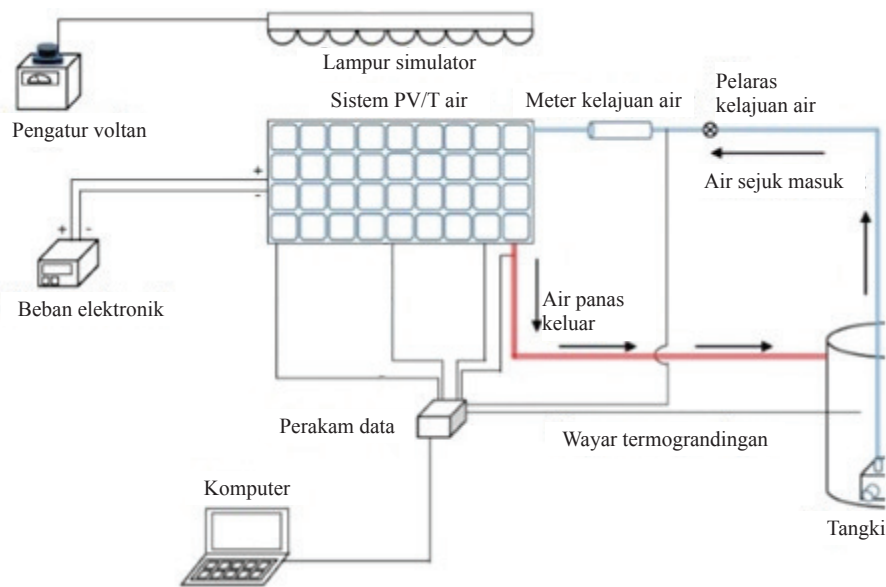
kehilangan optikal yang tinggi dan menurunkan 16% kecekapan elektrik bagi pengumpul PV/T yang asas. Oleh kerana sedikitnya penyelidik yang melakukan kajian terhadap pengumpul PV/T aliran air, maka dalam kertas kerja ini akan dibincangkan reka bentuk dan penilaian kecekapan pengumpul PV/T aliran air.

BAHAN DAN KAEDAH

Dalam kajian ini, sel suria polihabur (p-Si) akan digunakan untuk pengumpul fotovoltan. Jenama pengumpul fotovoltan yang digunakan adalah SHARP dengan modul NE-80E2EA. Pengumpul fotovoltan ini telah diuji oleh pengeluar di bawah keamatan sinaran 1000 W/m² dan suhu bilik 25°C yang mencapai kuasa maksimum sebanyak 80W. Daripada spesifikasi panel PV yang digunakan, voltan maksimum yang boleh dicapai oleh pengumpul fotovoltan adalah 17.3 V dan arus maksimum yang boleh dicapai adalah 4.63 A.

Rajah 1 menunjukkan gambaran asas pengumpul PV/T aliran air yang dibina. Komponen utama daripada pengumpul PV/T ini terdiri modul PV, pengumpul haba berbentuk spiral, penebat, tangki penyimpanan dan pam air. Pengumpul haba seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2, mengandungi satu saluran yang dibuat untuk membenarkan air untuk mengalir. Pengumpul haba berbentuk spiral ini diletakkan dibawah modul PV.

Bacaan data terma daripada termogandingan direkod menggunakan perakam data jenis ADAM - 4019. Perakam data ADAM mempunyai dua terminal iaitu positif dan negatif dan mempunyai 16 saluran untuk sambungan dengan termogandingan. Data yang direkod daripada perakam data ini boleh dilihat terus daripada komputer peribadi bagi melihat tindak balas pengumpul PV/T dengan suhu. Piranometer yang digunakan dalam kajian ini adalah piranometer jenis EPPLEY model 8-48 yang terdapat di Jabatan Fizik, Universiti Kebangsaan Malaysia.



RAJAH 1. Gambarajah skema pengumpul PV/T dan persediaan uji kaji di bawah simulator suria



RAJAH 2. Gambarajah penyerap haba berbentuk spiral

Piranometer merupakan alat yang digunakan untuk mencerap keamatan sinaran daripada lampu halogen. Piranometer EPPLEY ini mudah dikendali dan ia tidak memerlukan alat penjejak matahari.

Pengumpul PV/T diuji di bawah keamatan sinaran dan kadar aliran jisim air yang berbeza bagi melihat prestasi dan tindak balas yang dihasilkan. Langkah-langkah ujikaji ke atas pengumpul PV/T akan dijalankan seperti berikut:

Penyambungan litar dan paip aliran air dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Rajah 1. Penyambungan antara pengumpul fotovoltan dan beban elektronik adalah dengan menggunakan klip buaya. Air dengan kelajuan kadar aliran jisim air 0.01 kg/s dialirkan ke pengumpul PV/T daripada tangki air dengan menggunakan pam air. Air yang melalui bawah permukaan pengumpul fotovoltan dialirkan semula ke dalam tangki air untuk digunakan semula. Setiap pengatur voltan dinaikkan kepada 75 V iaitu 300 W/m². Pengumpul PV/T didedahkan kepada sinaran lampu simulator dengan keamatan 300 W/m². Apabila data suhu pengumpul fotovoltan berada dalam keadaan mantap, bacaan arus dan voltan diambil menggunakan beban elektronik. Keamatan sinaran diambil menggunakan piranometer. Bacaan 16 titik termogandingan disambungkan kepada perakam data dan seterusnya kepada komputer peribadi. Bacaan arus dan voltan daripada beban elektronik diplotkan dalam graf lengkung I-V bagi mendapatkan nilai kuasa maksimum dengan menggunakan formula:

$$P = IV$$

dengan I ialah arus (A) dan V ialah voltan (V).

Nilai kuasa maksimum yang diperoleh digunakan untuk mendapatkan kecekapan fotovoltan dengan menggunakan formula:

$$\eta_{PV} = \frac{I_m V_m}{AS} \times 100\%$$

dengan I_m ialah arus maksimum (A); V_m ialah voltan maksimum (V); A ialah luas permukaan fotovoltan (m²); dan S ialah keamatan sinaran lampu simulator (W/m²).

Setelah data terma diperoleh, kecekapan terma boleh dikira menggunakan formula:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{AS} \times 100\%$$

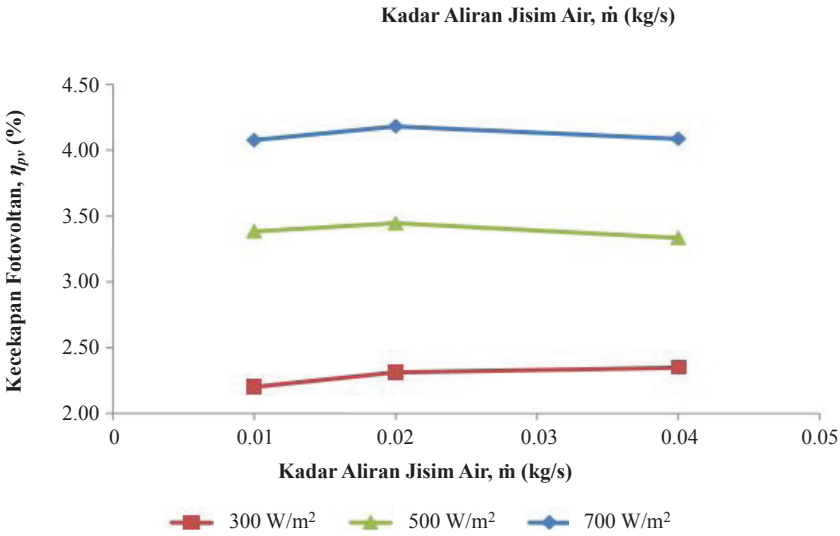
dengan \dot{m} ialah kadar aliran jisim air (kg/s); C_p ialah muatan haba tentu air (J/kg °C); T_o ialah suhu air keluar (°C); T_i ialah suhu air masuk (°C); A ialah luas permukaan fotovoltan (m²); dan S ialah keamatan sinaran lampu simulator (W/m²).

Langkah 2 hingga 12 diulang semula pada keamatan sinaran 500 W/m² dan 700 W/m² serta pada kadar aliran jisim air 0.02 kg/s dan 0.04 kg/s.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Pengumpul PV/T diuji pada tiga keamatan dan kadar aliran jisim air yang berbeza iaitu 300 W/m² (0.01, 0.02 dan 0.04 kg/s), 500 W/m² (0.01, 0.02 dan 0.04 kg/s) dan 700 W/m² (0.01, 0.02 dan 0.04 kg/s). Rajah 3 menunjukkan pengaruh kadar aliran jisim air terhadap kecekapan pengumpul fotovoltan pada keamatan sinaran 300, 500 dan 700 W/m². Kecekapan pengumpul fotovoltan meningkat daripada kadar aliran jisim air 0.01 hingga 0.02 kg/s pada semua keamatan dan menyusut pada 0.04 kg/s di bawah keamatan 500 dan 700 W/m². Tindak balas perubahan ini menunjukkan bahawa kecekapan fotovoltan yang optimum tercapai pada kadar aliran jisim air 0.02 kg/s. Merujuk kepada Jadual 1 pada kadar aliran jisim air 0.01 kg/s, kecekapan fotovoltan adalah 2.20% pada keamatan 300 W/m², kecekapan fotovoltan mencapai 3.38% pada keamatan 500 W/m² dan seterusnya meningkat kepada 4.08% pada keamatan 700 W/m². Pada kadar aliran jisim air 0.02 kg/s, kecekapan fotovoltan pada keamatan 300, 500 dan 700 W/m² adalah 2.31%, 3.45% dan 4.18%. Seterusnya pada kadar aliran jisim air 0.04 kg/s, kecekapan fotovoltan adalah 2.35%, 3.33% dan 4.09% pada keamatan 300, 500 dan 700 W/m².

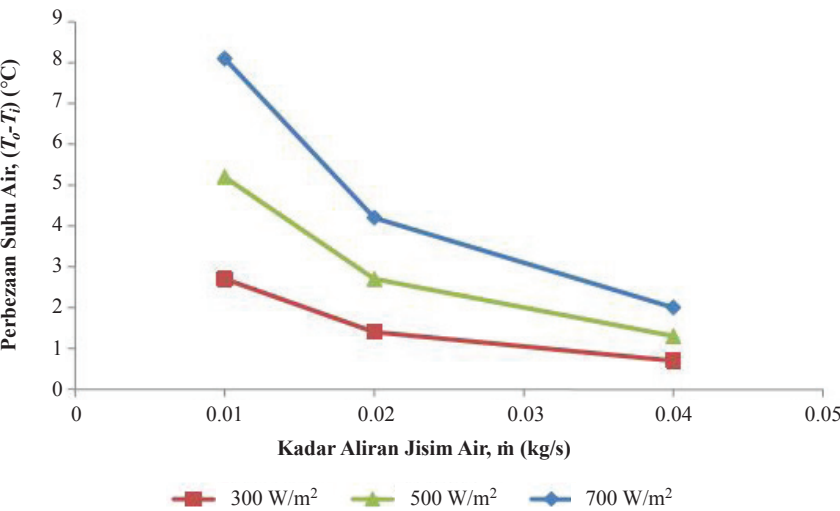
Kadar aliran jisim udara mempengaruhi kenaikan suhu pengumpul fotovoltan iaitu perbezaan suhu air antara suhu output, T_o dan suhu input, T_i . Merujuk kepada Rajah 4 dan Jadual 1, kenaikan suhu ($T_o - T_i$) akan



RAJAH 3. Perubahan kecekapan fotovoltan terhadap perubahan kadar aliran jisim air di bawah keamatan sinaran yang berbeza

JADUAL 1. Kecekapan pengumpul PV/T aliran air

\dot{m} (kg/s)	$I = 300 \text{ W/m}^2$				$I = 500 \text{ W/m}^2$				$I = 700 \text{ W/m}^2$			
	$T_o - T_i$ (°C)	η_{PV} (%)	η_{th} (%)	η_{PVT} (%)	$T_o - T_i$ (°C)	η_{PV} (%)	η_{th} (%)	η_{PVT} (%)	$T_o - T_i$ (°C)	η_{PV} (%)	η_{th} (%)	η_{PVT} (%)
0.01	2.7	2.20	64.84	67.05	5.2	3.38	73.04	76.43	8.1	4.08	74.13	78.20
0.02	1.4	2.31	68.47	70.78	2.7	3.45	74.39	77.84	4.2	4.18	76.68	80.86
0.04	0.7	2.35	67.65	70.00	1.3	3.33	72.19	75.52	2.0	4.09	73.12	77.21



RAJAH 4. Perubahan perbezaan suhu air terhadap perubahan kadar aliran jisim air di bawah keamatan sinaran yang berbeza

berkurangan apabila kadar aliran jisim air meningkat pada semua keamatan sinaran. Julat perbezaan suhu air bagi kadar aliran jisim air yang berbeza menjadi lebih besar apabila keamatan semakin tinggi. Pada keamatan 300 W/m², suhu berkurang sebanyak 1.3°C apabila kadar aliran jisim air meningkat kepada 0.02 kg/s dan pada 0.04 kg/s suhu terus berkurang sebanyak 0.7°C. Apabila keamatan meningkat kepada 500 W/m² julat perbezaan suhu menjadi lebih besar berbanding keamatan sebelum ini, iaitu suhu berkurang sebanyak 2.5°C daripada 0.01 kg/s kepada 0.02 kg/s dan suhu terus berkurang sebanyak 1.4°C apabila kadar aliran jisim air meningkat. Seterusnya perbezaan suhu terus meningkat pada keamatan 700

W/m², dengan suhu berkurang sebanyak 3.9°C apabila mencapai kadar aliran jisim air 0.02 kg/s dan pada 0.04 kg/s suhu telah berkurang sebanyak 2.2°C.

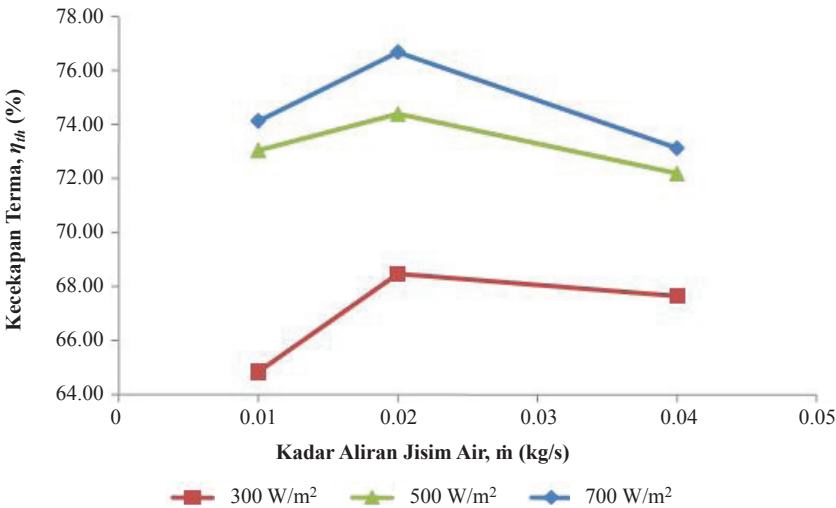
Perubahan perbezaan suhu terhadap perubahan kadar aliran jisim air memberikan kesan yang signifikan terhadap kecekapan terma. Rajah 5 dan Jadual 1 menunjukkan perubahan kecekapan terma pada kadar aliran jisim air 0.01, 0.02 dan 0.04 kg/s dengan keamatan 300, 500 dan 700 W/m². Pada keamatan 300 W/m², kecekapan terma meningkat sebanyak 3.63% apabila kadar aliran jisim air meningkat kepada 0.02 kg/s dan menurun semula sebanyak 1.02% pada kadar aliran jisim air 0.04 kg/s. Manakala bagi keamatan 500 W/m², apabila kadar aliran jisim air

berubah daripada 0.01 kepada 0.02 kg/s, kecekapan terma meningkat sebanyak 1.35% dan seterusnya menurun sebanyak 2.2% pada kadar aliran jisim air 0.04 kg/s. Apabila keamatan meningkat kepada 700 W/m², kecekapan terma meningkat sebanyak 2.55% pada kadar aliran jisim air 0.02 kg/s dan turun semula sebanyak 3.56%. Pola perubahan bagi ketiga-tiga keamatan adalah sama dengan kecekapan terma meningkat daripada kadar aliran jisim air 0.01 kepada 0.02 kg/s dan keadaan terus berubah apabila kecekapan menyusut ketika kadar aliran jisim air meningkat kepada 0.04 kg/s. Tindak balas perubahan ini menunjukkan nilai kecekapan terma optimum tercapai pada kadar aliran jisim air 0.02 kg/s.

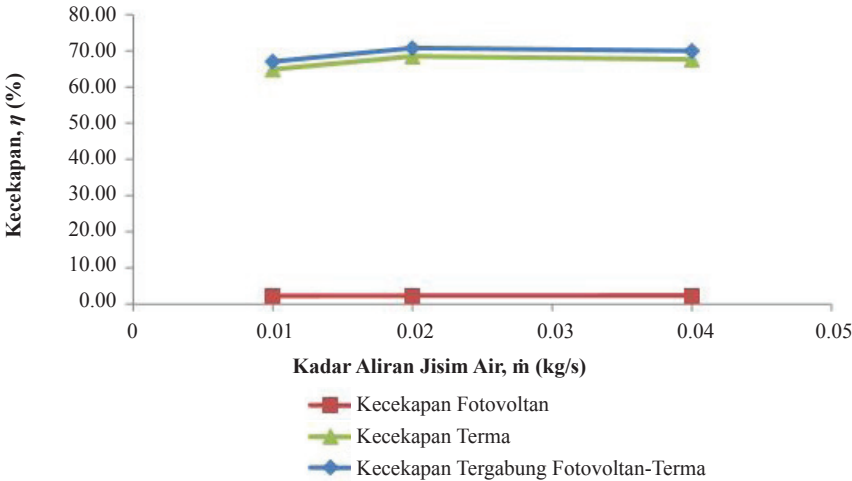
Kecekapan tergabung pengumpul fotovoltan-terma merupakan gabungan daripada kecekapan fotovoltan dan kecekapan terma. Berdasarkan kepada keputusan kajian, didapati bahawa kecekapan fotovoltan dan terma meningkat daripada kadar aliran jisim air 0.01 kepada 0.02 kg/s dan menurun apabila kadar aliran jisim meningkat kepada 0.04 kg/s. Oleh itu, kecekapan tergabung pengumpul juga mengalami pola perubahan yang sama. Rajah 6 hingga Rajah 8 dan Jadual 1

menunjukkan perubahan yang berlaku di bawah keamatan 300, 500 dan 700 W/m² apabila kadar aliran jisim udara berubah daripada 0.01 kepada 0.04 kg/s. Rajah 6 menunjukkan kematan pada 300 W/m², kecekapan tergabung pengumpul meningkat sebanyak 3.73% pada kadar aliran jisim air 0.01 kepada 0.02 kg/s dan menurun sedikit sebanyak 0.78% pada kadar aliran jisim air 0.04 kg/s. Pada keamatan 500 W/m² (Rajah 7), apabila kadar aliran jisim air meningkat daripada 0.01 kg/s kepada 0.02 kg/s kecekapan meningkat sebanyak 1.41% dan menurun sebanyak 2.32% apabila aliran air semakin laju. Seterusnya pada keamatan 700 W/m² (Rajah 8), kecekapan meningkat sebanyak 2.66% apabila kadar aliran jisim air meningkat kepada 0.02 kg/s dan kembali menurun 3.65% pada kadar aliran jisim air 0.04 kg/s. Kecekapan tergabung pengumpul tertinggi diperoleh pada kadar aliran jisim air 0.02 kg/s.

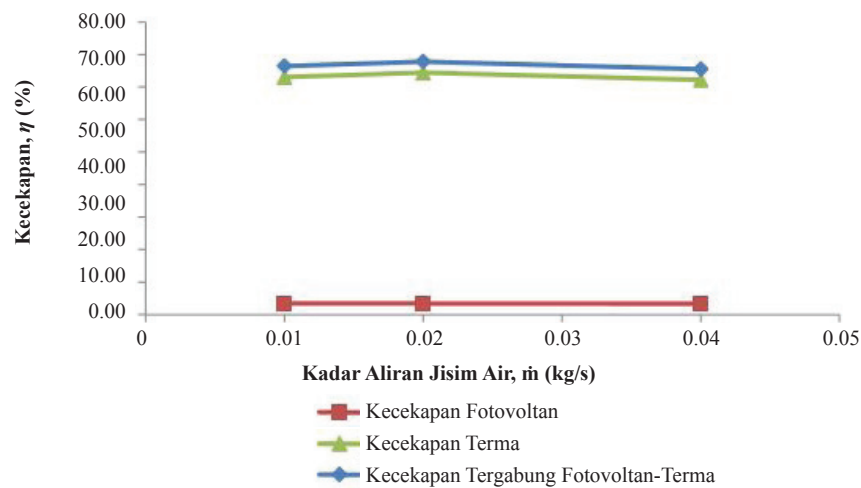
Berdasarkan keputusan analisis kajian yang diperoleh, dapat dinyatakan bahawa kecekapan pengumpul fotovoltan, terma dan tergabung dipengaruhi atau bergantung kepada kadar aliran jisim air yang dialirkan ke dalam pengumpul PV/T. Kadar pemindahan haba daripada pegumpul



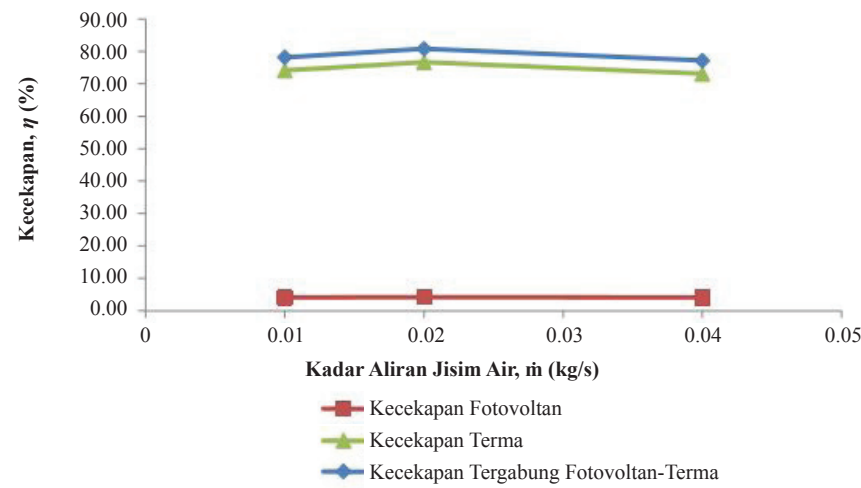
RAJAH 5. Perubahan kecekapan terma terhadap perubahan kadar aliran jisim air di bawah keamatan sinaran yang berbeza



RAJAH 6. Perubahan kecekapan terhadap kadar aliran jisim air berbeza dan di bawah keamatan sinaran 300 W/m²



RAJAH 7. Perubahan kecekapan terhadap kadar aliran jisim air berbeza dan di bawah keamatan sinaran 500 W/m²



RAJAH 8. Perubahan kecekapan terhadap kadar aliran jisim air berbeza dan di bawah keamatan sinaran 700 W/m²

JADUAL 2. Keputusan kajian daripada penyelidik terdahulu mengenai pengumpul PV/T

Reka bentuk pengumpul	Bentuk tiub/saluran	Kadar aliran jisim air (kg/s)	Kecekapan terma	Kecekapan fotovoltan (%)	Rujukan
Spiral	Segi empat	0.01	50.12	11.98	Ibrahim et al. (2009)
Sheet dan Tube	Bulat	0.02	52 & 58	8.9 & 9.7	Zondag et al. (2013)
Spiral	Segi empat	0.041	54.6	13.8	Fudholi et al. (2014)
Sheet dan Tube	Bulat	0.02	66 & 70	14 & 15	Kim dan Kim (2012a)
Saluran berbentuk kotak	Segi empat	0.02	51	14.3	Kim dan Kim (2012b)
Saluran berbentuk kotak	Segi empat	N.A	71 & 76	N.A	Sandness dan Rekstad (2002)
Saluran berbentuk kotak	Segi empat	0.02	57	12	Chow et al. (2006)
Saluran berbentuk kotak	Segi empat	Pengaliran semula jadi	45	10.1	Ji et al. (2007)
Spiral	Segi empat	0.02	76.68	4.18	Kajian ini

fotovoltan, pengumpul terma dan seterusnya kepada aliran air meningkat apabila kadar aliran air meningkat. Namun, jika aliran air menjadi terlalu laju proses pemindahan haba akan menjadi tidak sempurna kerana air tidak dapat menyerap haba secukupnya daripada pengumpul. Apabila kadar aliran jisim air yang optimum dapat dicapai, kecekapan pengumpul boleh berada pada tahap

yang maksimum iaitu berada pada keadaan suhu yang rendah. Keputusan kajian menunjukkan bahawa kecekapan pengumpul PV/T yang optimum diperoleh pada kadar aliran jisim air 0.02 kg/s yang diuji pada semua keamatan sinaran. Keputusan kajian ini boleh dibandingkan dengan keputusan kajian daripada penyelidik terdahulu seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2.

KESIMPULAN

Pengumpul PV/T aliran air dengan reka bentuk pengumpul terma spiral telah berjaya dibina dan prestasinya berdasarkan kecekapan fotovoltan, terma dan tergabung PV/T berjaya dianalisis. Sistem ini juga telah diuji di bawah keamatan sinaran iaitu 300, 500 dan 700 W/m² dan pada kadar aliran jisim air 0.01, 0.02 dan 0.04 kg/s bagi mendapatkan keadaan yang optimum. Setelah semua data telah dianalisis, maka dapat disimpulkan bahawa pengumpul PV/T berada pada keadaan yang optimum iaitu pada kadar aliran jisim air 0.02 kg/s. Keputusan kajian ini jelas menunjukkan pengumpul PV/T ini berada pada keadaan yang memuaskan, dengan kecekapan termanya lebih tinggi daripada kajian sebelumnya.

PENGHARGAAN

Para penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Jabatan Fizik, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia kerana menyediakan kemudahan untuk kajian ini dijalankan. Juga, SERI UKM yang telah memberikan geran penyelidikan di bawah dana DLP-2015-005 dan GP-K020448.

RUJUKAN

- Aste, N., Del Pero, C. & Leonforte, F. 2014. Water flat plate PV/ Thermal collector: A review. *Solar Energy* 102: 98-115.
- Chow, T.T., He, W. & Ji, J. 2006. Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. *Solar Energy* 80: 298-306.
- Dupreyat, P., Menezo, C. & Fortuin, S. 2014. Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system. *Energy and Buildings* 68: 751-755.
- Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M.H., Ruslan, M.H., Ibrahim, A. & Kazem, H.A. 2014. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. *Energy Conversion and Management* (78): 641-651.
- Ibrahim, A., Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M.Y. & Ruslan, M.H. 2014. Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system. *Energy Conversion and Management* 77: 527-534.
- Ibrahim, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Alghoul, M.A., Yahya, M., Zaharim, A. & Sopian, K. 2009. Performance of photovoltaic thermal collector (PVT) with different absorbers design. *WSEAS Transaction on Environment and Development* 5(3): 321-330.
- Ji, J., Lu, J.P., Chow, T.T., He, W. & Pei, G. 2007. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy* 84(2): 222-237.
- Kim, J.H. & Kim, J.T. 2012a. The experimental performance of an unglazed PVT collector with two different absorber types. *International Journal of Photoenergy* 2012: 1-6.
- Kim, J.H. & Kim, J.T. 2012b. The experimental performance of an unglazed PV-thermal collector with a fully wetted absorber. *Energy Procedia* 30: 144-151.
- Mishra, R.K. & Tiwari, G.N. 2013. Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal water collector for constant collection temperature mode. *Solar Energy* 90: 58-67.
- Sadishkumar, S. & Balusamy, T. 2014. Performance improvement in solar water heating systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37: 191-198.
- Sandnes, B. & Rekstad, J. 2002. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate: Experimental study and analytical model. *Solar Energy* 72: 63-73.
- Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, T., Souliotis, M. & Yianoulis, P. 2002. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy* 72(3): 217-234.
- Zondag, H.A. 2008. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews* 12: 891-959.
- Zondag, H.A., de Vries, D.W., van Helden, W.G.C., van Zolingen, R.J.C. & van Steenhoven, A.A. 2003. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy* 74: 253-269.

Solar Energy Research Institute
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: a.fudholi@gmail.com

Diserahkan: 18 September 2017

Diterima: 8 November 2017

